

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.007

玉米分层正位穴施肥精播机 SPH 仿真与试验

张俊雄 刘华猛 高 金 蔺泽虹 陈 英
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了有效地将化肥集中施在玉米植株下方根系生长的区域内,以减少化肥用量,设计了一种玉米分层正位穴施肥精播机。在对穴施肥精播机进行实体建模的基础上,结合 MAT147 土壤材料模型与 SPH(光滑粒子流体动力学)算法,运用 LS-DYNA 模拟并分析了穴施肥系统的间歇排肥机构的落肥状态,以及分层排肥管将化肥施入土壤之后的分布情况。通过土槽和田间试验验证,表明分层正位穴施肥精播机能够精确地将所需化肥按预定比例施入不同深度土层中,化肥分布于种子正下方深度为 7~23 cm 的土层内,化肥集中在最深施肥层中,并且化肥分布由深至浅依次递减,符合玉米生长过程中的实际需肥规律。

关键词: 玉米; 穴施肥; 分层施肥; SPH 算法

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0066-07

Simulation and Test of Corn Layer Alignment Position Hole Fertilization Seeder Based on SPH

ZHANG Junxiong LIU Huameng GAO Jin LIN Zehong CHEN Ying
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: It is an effective way to reduce chemical fertilizer consumption by changing the fertilization method from traditional strip fertilization to applying fertilizer to concentrated growth zone around the roots of the corn plant. A kind of full layer and hole fertilization of corn seeder was designed. The virtual prototype of fertilizer distributor was designed, and the physical engine in Solidworks was used to carry out the motion simulation of the batch fertilizer and the discharge pipe, and optimize the discharging mechanism to make the fertilizer discharge faster and more concentrated, so that the fertilizer can be applied into the soil in 0.15 s. LS-DYNA was used to simulate and analyze the falling fertilizer status of intermittent fertilizer mechanism of the layer and hole fertilization system, and the distribution of fertilizer in soil applied by the layered fertilizer pipe, with the MAT147 soil model and smoothed particle hydrodynamics (SPH) algorithm. The simulation results showed that the mechanism can apply fertilizer to the depth from 7 cm to 23 cm under the surface of soil, and concentrate in a cylindrical space with diameter of 150 mm. The amount of fertilizer in this space was increased with the increase of depth, and the quantity was maximum in the deepest layer, it met the practical application requirements of corn plant growth and reduced unnecessary fertilizer waste. Soil bin test and field test were carried out, and the results agreed well with the simulation results. This novel layer hole fertilization can effectively reduce the consumption of chemical fertilizer.

Key words: corn; hole fertilization; layer fertilization; SPH algorithm

0 引言

玉米机械化施肥方式主要是条施肥,但由于玉米株距较大,这种施肥方式容易造成两株之间离根

较远的肥料的浪费。市场上常见的玉米施肥播种机和近几年对于玉米施肥播种机的研究中所使用的施肥方式也仍以条施肥为主^[1-4]。但是,根据玉米根系生长阶段特点,不同时期的根系深度和所需肥量

收稿日期: 2018-03-02 修回日期: 2018-05-07
基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD23B02)
作者简介: 张俊雄(1979—),男,副教授,博士,主要从事农业机器人研究,E-mail: cau2007@cau.edu.cn
通信作者: 陈英(1969—),女,副教授,博士,主要从事数字化设计及农业机器人研究,E-mail: cy@cau.edu.cn

的不同,一些学者也对玉米的分层施缓释肥进行了研究^[5-6],在条施肥的基础上分层将玉米全生长周期所需肥料施入地下不同深度,克服了多次施肥的问题,但是仍存在条施肥浪费化肥的缺点。

穴施肥方式的优点在于其可减少化肥使用量,且化肥集中在玉米植株下方根系生长的区域内,可有效减少化肥的浪费。目前穴施肥系统以扎穴式为主^[7-8]。但扎穴式穴施肥系统无法满足深施肥要求。张勋^[9]提出了一种穴播穴施肥播种机方案,通过电磁铁控制肥料成穴,但并未得到实践验证。

由于农机具工况的复杂性与传统试验的局限性,有限元分析方法在农机的复杂工况分析领域被大量使用^[10-12]。在农机具与土壤相互作用方面的研究中,夏俊芳等^[13]对螺旋刀辊切削土壤进行有限元模拟,土壤被切削之后仍成条状并且网格畸变无规律,不能真实地反映土壤变形过程。为解决这一问题,蒋建东等^[14]将任意拉格朗日-欧拉法(Arbitrary Lagrange-Euler,ALE)引入有限元方法,于建群等^[15]与潘世强等^[16]使用离散元法进行开沟过程仿真。但有限元方法在大变形领域的局限性限制了其在农机领域的适用范围。近年来光滑粒子流体动力学算法(Smoothed particle hydrodynamics,SPH)被广泛使用在农机领域中进行仿真并取得较好效果^[17-20]。

本文设计一种玉米正位分层穴施肥机构并进行整机的设计建模,使用LS-DYNA软件,采用SPH算法对该分层穴施肥机构在土壤中的行进状况与施肥状况进行模拟,使用LS-Prepost中的点追踪方法对化肥在土壤中的关键点位置以及化肥整体形状进行追踪,从而模拟出单穴化肥在土壤中的情况,最后通过土槽试验及田间试验对仿真结果进行验证。

1 整机结构与建模

玉米分层正位穴施肥精播机由机架、分层正位穴施肥单体、电控播种单体、地轮与测速地轮等关键部件构成,如图1所示。多个施肥单体与播种单体连接在一起安装在机架横梁上,整套机构通过安装在机架横梁上的三点悬挂机构与拖拉机相连。穴施肥开沟器结构如图2所示,工作时外槽轮排肥器将化肥从肥箱中经由波纹管排出,波纹管将化肥排进间歇排肥装置的空腔内,间歇施肥装置由单片机控制翻板的开合,通过翻板间断开合间断地将化肥排入分层施肥管中。横截面为矩形的排肥管内腔由金属片分割成4个小管。化肥从这4个小管中落下,从不同的出肥口排出,落入土壤成穴。之后安装在分层正位穴施肥单体下方的碎土轮进行覆土作业,

将土壤表面进行平整利于之后进行播种作业。电控播种单体也由该单片机控制排种,排种器选用指夹式排种器以保证较高的排种精度,采用大扭矩步进电动机带动同步带进行驱动,排种器旋转一周排出12粒种子。播种机每前进预定的株距距离,单片机即向排肥步进电动机发送高电平进行排肥控制,之后经过程序预置的延时时间后发送高电平进行排种控制。排种器与排肥器间距为90 cm,理想状态的肥穴直径为15 cm,根据预定株距的不同来进行计算,通过排种、排肥的延时时间间隔保证穴施肥的位置精度。

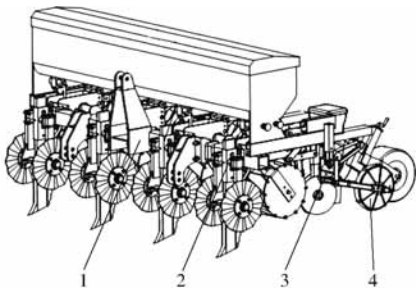


图1 玉米分层正位穴施肥精播机结构示意图

Fig.1 Structure sketch of corn layer alignment position hole fertilization seeder

1. 机架 2. 分层正位穴施肥单体 3. 电控播种单体 4. 测速地轮

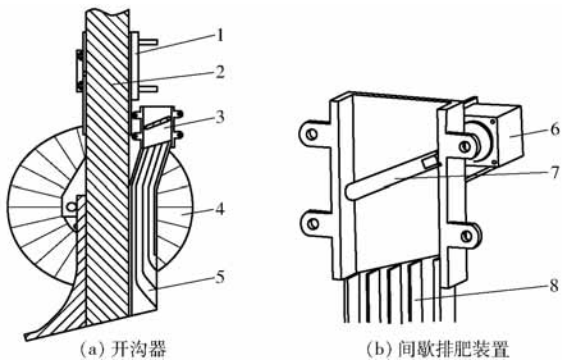


图2 穴施肥开沟器结构示意图

Fig.2 Structure sketch of hole fertilizer opener

1. 前固定板 2. 深耕开沟器 3. 间歇排肥装置 4. 覆土波纹盘
5. 分层施肥管 6. 步进电动机 7. 翻板 8. 分层施肥管内隔板

在仿真中,在不影响精确度的前提下将分层排肥管与间歇排肥装置进行简化建模,仅保留必要工作部件。使用简化后的模型进行运动仿真,模拟出化肥在开始下落到离开分层排肥管的过程。同时将深耕穴施肥开沟器与覆土波纹盘进行简化建模以便进行仿真。

2 穴施肥过程仿真

2.1 落肥区域模拟

玉米缓释肥在8万株/hm²的情况下,最佳施肥

量约为 975 kg/hm^2 ^[21]。在此施肥量下每棵植株的施肥量约为 12.2 g 。玉米缓释肥多为颗粒状,在仿真中设置为直径 3 mm 的球体。对整套机构设置重力约束,对所有模型设置物理碰撞体积,所得化肥下落过程仿真结果如图 3 所示。

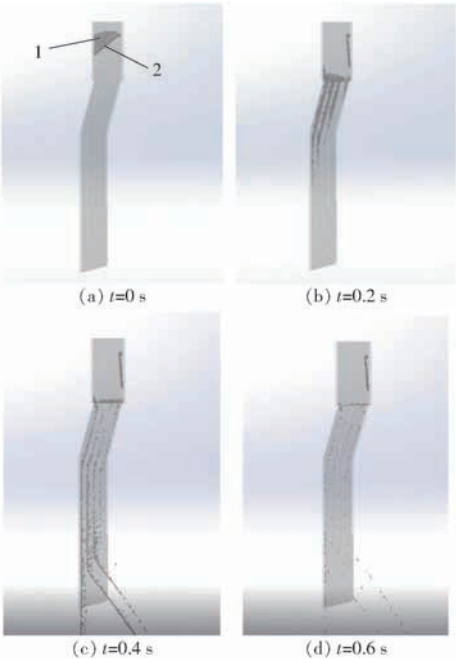


图 3 化肥下落过程
Fig. 3 Fertilizer drop process
1. 化肥 2. 翻板

翻板翻转后所有化肥颗粒受重力影响下落,落入分层排肥管中。根据仿真结果逐帧计算时间,4 层排肥道中自下而上有肥排出的时间依次为 0.225 、 0.213 、 0.163 、 0.088 s ,以试验中拟采取的拖拉机行进速度 1 km/h 计算,自下而上各层的化肥分布区长度(沿播种机前进方向)分别为: 7.50 、 6.38 、 4.88 、 2.63 cm 。分层排肥管最下一层开口与其他 3 层开口设置为不在同一竖直线上,从而缩小化肥分布区长度。将化肥下落效果理想化,即仅考虑分布区长度、行进速度、排肥道口位置、落肥时间后绘制如图 4 所示化肥自排肥管排出的理想位置图。

结合仿真结果可得,最底层施肥量最大,约占总肥量的一半。自下而上逐层递减,最顶层只有少量化肥,符合玉米的生长需肥规律。

2.2 SPH 算法简介

SPH 算法是一种无网格仿真方法,基本理念是将连续的物体看作一个个相互作用的微粒来考虑,这些微粒之间相互作用,形成复杂的运动,但是对于每一个粒子仍然遵守牛顿第二定律^[22-24]。SPH 算法通过将连续体视为粒子,但连续体中每个位置参与运算的值都是由周围一组粒子累加起来的。SPH 算法在处理土体大变形问题时十分稳健可靠,

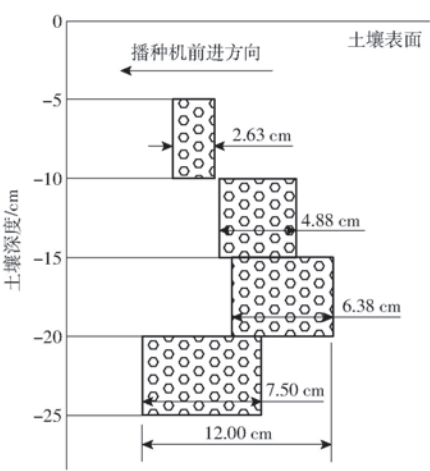


图 4 化肥纵向分布图
Fig. 4 Fertilizer vertical distribution

且和传统的 MM - ALE(多物质 ALE)方法相比所使用的 CPU 时间较少并且更加容易实现,使得 SPH 方法近几年被广泛应用在土体大变形的处理中^[25]。

土壤是由土壤微粒、孔隙气和水组成的三相材料,但是在实例分析时经常将土壤看作连续介质。本次模拟分析中采用 LS - Prepost 中的 MAT147 (MAT_FHWA_SOIL) 材料作为土壤材料,该模型是一个改进的 Drucker - Prager 可塑性模型。除了塑性模型,FHWA 土壤材料模型还包括预峰值硬化、峰值后应变软化(损伤)、应变率效应(强度增强)、孔隙水效应(湿度效应)和侵蚀能力。对标准土壤材料模型的这些改进是为了提高实例应用的精度、稳定性和易用性^[25-26]。

本次仿真中设定的土壤材料的各具体参数由中国农业大学农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室提供,具体参数见表 1。

表 1 土壤参数
Tab. 1 Soil parameters

参数	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 156
土粒比重	2.65
粘塑性参数	1.1
剪切模量/MPa	2.7
体积模量/MPa	5.9
内摩擦角/rad	0.42
含水率/%	23.57
内聚力/kPa	12

2.3 基于 SPH 算法的穴施肥状态仿真

在将深耕穴施肥开沟器与覆土波纹盘进行简化建模时,删除间歇排肥装置,仅进行一次排肥过程的仿真分析,并且在 Creo 中建立一个 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}\times 1\text{ 000 mm}$ 的长方体代表土壤,导入 ANSYS Workbench 中进行设置,网格划分与坐标系设置如

图 5 所示。

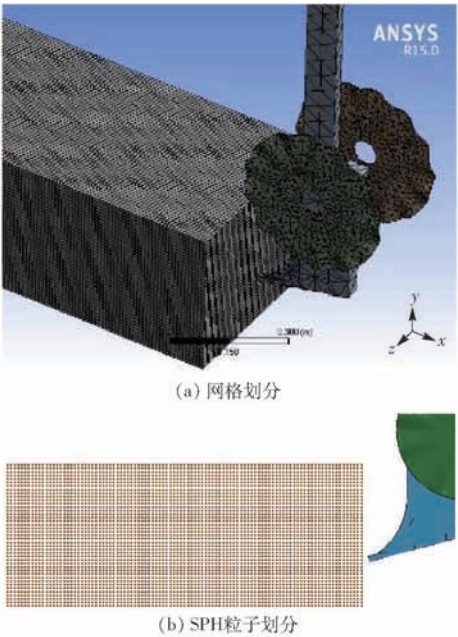


图 5 ANSYS 分析设置
Fig.5 ANSYS settings

在 ANSYS Workbench 中的前处理工作完成后, 导出 K 文件, 并利用 LS - Prepost 对 K 文件进行修改。

创建 SPH 模型, 选择粒子生成方式为 Solid Nodes, 选择中间土壤模型, SPH 密度设置为 $1\,156\text{ kg/m}^3$, 生成土壤 SPH 模型。

(1) 添加约束: 将土壤 SPH 粒子最外围粒子约束自由度。设置 SPH 粒子与开沟器、覆土器零件自动点面接触, 主接触面为开沟器和覆土器, 从接触面为所有 SPH 粒子, 接触面滑动摩擦因数为 0.4。

(2) 设置参数: 设置接触面惩罚系数为 1; RWEN 为 2, 表示计算能量耗散; 设置 IDIM 为 3, 采用三维粒子算法, 设置 MEMORY 为 300, 初始粒子内存为 300。

(3) 设置开沟器与覆土器材料 MAT_RIGID_TITLE, 设置密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 $2.1 \times 10^{11}\text{ Pa}$, 泊松比为 0.3。其中开沟器材料约束 Y、Z 轴的平动以及绕 X、Y、Z 轴的转动, 覆土器材料约束 Y、Z 轴的平动及绕 X、Y 轴的转动, 设置土壤材料为 MAT_FHWA_SOIL。

3 仿真结果与分析

3.1 化肥落入土壤后的形状分析

将化肥初始位置图与 LS - DYNA 的仿真结果结合, 使用 LS - Prepost 中的点标记功能进行化肥入土后的位置追踪, 得到结果如图 6a 所示, 从图中标记部分区域 2 位置处可以看出, 在 23 ~ 25 cm 之间

的 SPH 粒子未被扰动, 可见这些位置在化肥落下前已经被自然回落的土壤覆盖住, 无化肥分布; 而在区域 1 标记的位置处可以看出上方的化肥由于土壤的自然回落与两侧波纹盘的挤压而产生向下、向中间的位移, 所以实际情况应为 7 ~ 23 cm 有化肥, 其空间分布呈下宽上窄的形状。

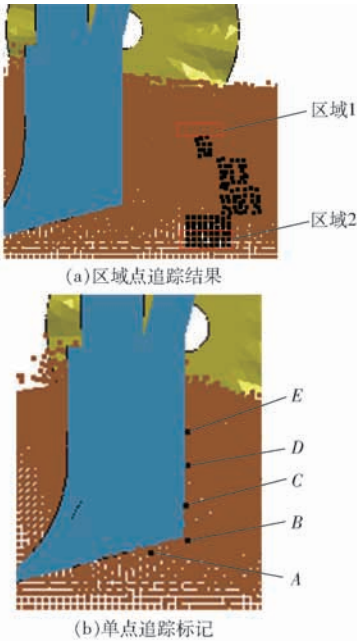


图 6 点追踪图
Fig.6 Point tracking results map

3.2 化肥各层点追踪位移情况

将整穴化肥按照深度划分为 4 部分, 如图 6b 所示, 将分层排肥管排肥口的上下边界分别标识为 A、B、C、D、E 共 5 个点进行追踪, 根据不同深度的点的位移模拟出该穴中化肥分布区域形状与理想状况下的形状差异。

5 个跟踪点的坐标变化如图 7 所示, 横坐标从 0.5 s 化肥落入土壤的瞬间开始计算。由图 7b 可以看出, 位于最上方的 D、E 两点有一定程度的前移, 但在 0.6 s 之后被明显抑制住, 说明波纹覆土盘能够加速土壤回落并且有使 5 ~ 10 cm 化肥颗粒落点前移的效果, 保证化肥下落之后位置与预想的位置相近; 竖直方向坐标图中可以看出除了 A 点之外其他 4 点皆有一定程度的下落, 下落后最高的位置大致为离土壤表面 7 cm 处, 可以有效避免种子与化肥接触造成烧苗状况。同时, 由于开沟器对于土壤的扰动, 造成土壤 SPH 颗粒已不规则, 落肥瞬间各标记点水平方向初始坐标值略有差别, 但经过波纹盘覆土之后可以使化肥更加聚集。综合 5 个不同颗粒的三维坐标值变化可以看出, 经过土壤的自动回落以及波纹覆土盘的挤压能够使图 4 中形状本来有些散乱的化肥分布更加凝聚, 更加满足施肥要求。

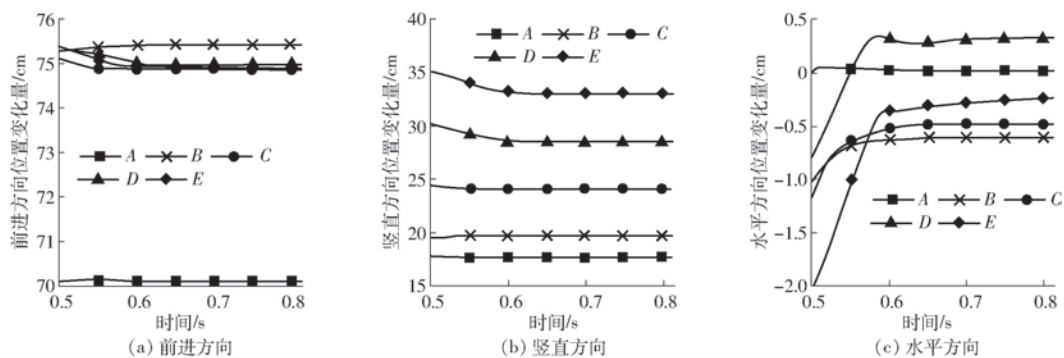


图7 标记点坐标位置变化
Fig.7 Change of position of each point coordinates

4 土槽试验

土槽试验在中国农业大学农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室的土槽内进行,应用的试验设备包括玉米正位穴深施肥精播单体、土槽试验台车及控制系统、调制土壤用的旋耕机、压实机等。试验前将土壤旋耕、压实;将单体与台车相连,关闭外槽轮式排肥器,将地轮压紧在土壤表面,启动土槽台车,排种器工作,按预定距离排种,将土壤表层拨开,找到种子,记录位置。取土方法参照 GB/T 6973—2005^[27],以种子为圆心将自制的取土环刀插入地下,取出并拍照记录每穴化肥的分布情况,如

图 8 所示。图 8a ~ 8e 分别为距离土表深为 5、10、15、20、25 cm 位置的化肥分布情况。如图 8a、8b 所示,5 cm 处横切面上没有任何化肥分布,10 cm 处横切面上仅有少量化肥分布;如图 8c 所示,15 cm 处正处于图 6b 中 B 点所示位置,结合图 6a,此处化肥分布范围最大但密度相对 20 cm 处较小;如图 8d 所示,20 cm 处化肥十分密集且分布范围较小;如图 8e 所示,将取土环刀取出土时切面上基本无化肥分布。土槽试验中所播化肥分布区域形状与仿真结果吻合,将化肥筛出称量并进行统计,统计结果见表 2。由表 2 可见,平均每穴施肥量与预设值基本相符,说明间歇排肥机构能够精确地控制每穴化肥的总量。

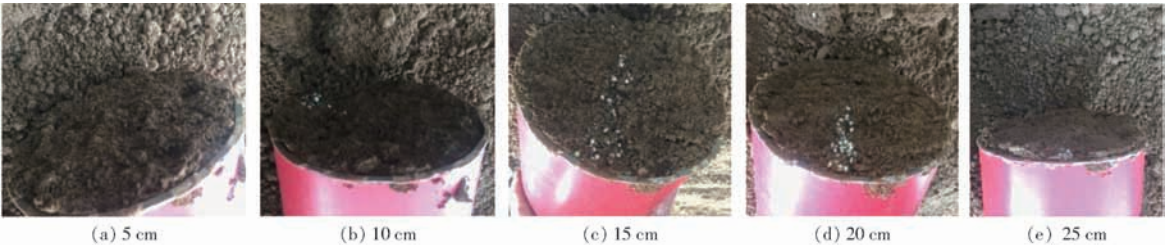


图8 穴施肥试验结果
Fig.8 Hole fertilization experiment results

表2 施肥检测结果
Tab.2 Fertilization test results

参数	检测结果
平均每穴施肥量/g	13.72
标准差	1.23
变异系数	0.09
施肥深度合格率/%	89.5
施肥范围合格率/%	83.5

5 田间试验

田间试验于 2017 年 4 月在北京市通州区北京国际都市农业科技园中进行。设置播种深度 5 cm,最大施肥深度 25 cm,株距为 25 cm。使用一个玉米分层正位穴施肥精播单体与一个玉米条施肥播种单体进行对比。两个单体的排肥速度相同。每行播种

50 m,各播 3 行。试验结果表明,施肥播种机通过性良好,作业过程如图 9 所示。



图9 田间试验状况
Fig.9 Experiment in farmland

播种后 10 d 观测玉米苗的生长状况,穴施肥垄中玉米苗长势良好,平均高度为 14 cm,而对比条施肥单体所播玉米苗平均高度仅为 11 cm。可见玉米精播中在使用同等化肥的情况下,采用本文的分层

正位穴施肥方法可提高化肥的利用率,促进玉米苗在拔节期初期的长势。

6 结论

(1)采用SPH算法研究穴施肥过程中化肥在土壤中的分布情况,建立了间歇施肥机构与土壤模型,通过LS-DYNA与Solidworks中的模拟情况,直观地反映出了在穴施肥过程中土壤以及化肥的运动过程。

(2)试验表明,间歇排肥器中排出的化肥经分层施肥管的分层,分布情况为最底层施肥量最大,由

下至上依次递减,符合玉米生长过程中的需肥规律。

(3)对穴施肥开沟施肥机构在土壤中运动的仿真结果表明,穴施肥开沟施肥机构对土壤的扰动较小,施肥状况良好,波纹盘在两侧对土壤起到了推动挤压的作用,提高了肥沟中回土速度,减小了化肥从施肥管中落下后所产生的位移,以保证化肥存在于水平方向120 mm与竖直范围70~230 mm的范围内。

(4)土槽试验结果与仿真结果的高度吻合表明该仿真方法用于模拟穴施肥化肥分布的可行性。田间试验表明分层正位穴施肥精播机能够完成穴施肥要求,提高化肥利用率,减少不必要的浪费。

参 考 文 献

- 林静,刘安东,李宝筏,等. 2BG-2型玉米垄作免耕播种机[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 43-46.
LIN Jing, LIU Andong, LI Baofa, et al. 2BG-2 type corn ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 43-46. (in Chinese)
- 刘忠军,刘立晶,杨学军,等. 指夹式玉米免耕精密播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 1-6.
LIU Zhongjun, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of no-till precision planter for corn[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 2): 1-6. (in Chinese)
- 王庆杰,何进,姚宗路,等. 驱动圆盘玉米垄作免耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 68-72.
WANG Qingjie, HE Jin, YAO Zonglu, et al. Design and experiment on powered disc no-tillage planter for ridge-tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 68-72. (in Chinese)
- 张军昌,闫小丽,薛少平,等. 秸秆粉碎覆盖玉米免耕施肥播种机设计[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 51-55.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.010.
ZHANG Junchang, YAN Xiaoli, XUE Shaoping, et al. Design of no-tillage maize planter with straw smashing and fertilizing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 51-55. (in Chinese)
- 王云霞,梁志杰,崔涛,等. 玉米分层施肥器结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 163-169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s025&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, CUI Tao, et al. Design and experiment of layered fertilization device for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 163-169. (in Chinese)
- 张小丽,张晋国,李江国,等. 双层施肥旋耕播种机的设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(11): 49-51.
ZHANG Xiaoli, ZHANG Jinguo, LI Jiangguo, et al. Design of rotary tillage planter with double-deck fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 49-51. (in Chinese)
- 李沐桐,温翔宇,周福君. 中耕作物精准穴施肥控制机构工作参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 37-43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160906&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.006.
LI Mutong, WEN Xiangyu, ZHOU Fujun. Working parameters optimization and experiment of precision hole fertilization control mechanism for intertilled crop[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 37-43. (in Chinese)
- 吴然然,张刘扬,钱梵梵,等. 玉米穴施肥装置的设计与仿真[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(5): 941-946.
WU Ranran, ZHANG Liuyang, QIAN Fanfan, et al. Design and simulation of cave-fertilizer apparatus for maize[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(5): 941-946. (in Chinese)
- 张勋. 玉米穴播穴施肥装置的设计研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
ZHANG Xun. Research on the equipment of hill-drop drill and fertilization[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- 傅泽田,董玉红,张领先,等. 温室自动施肥机的设计与仿真[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊1): 335-342.
FU Zetian, DONG Yuhong, ZHANG Lingxian, et al. Design and simulation of automatic fertilizing machine for greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 335-342. (in Chinese)
- 杨帆,李问盈,李洪文,等. 免耕播种机缺口圆盘刀有限元静强度分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 53-55, 80.
YANG Fan, LI Wenying, LI Hongwen, et al. Finite element analysis for gap disc of no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 53-55, 80. (in Chinese)

- 12 LIANG F, WANG D, WANG G, et al. The design and dynamics simulation analysis of the casting-furrow opener in the ditch [C]. 2013 ASABE Annual Internal Meeting, 2013; Paper No 131593539.
- 13 夏俊芳, 贺小伟, 余水生, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的螺旋刀辊土壤切削有限元模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 34-41.
XIA Junfang, HE Xiaowei, YU Shuisheng, et al. Finite element simulation of soil cutting with rotary knife roller based on ANSYS/LS-DYNA software[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 34-41. (in Chinese)
- 14 蒋建东, 高洁, 赵颖娣, 等. 基于 ALE 有限元仿真的土壤切削振动减阻[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊1): 33-38.
JIANG Jiandong, GAO Jie, ZHAO Yingdi, et al. Numerical simulation on resistance reduction of soil vibratory tillage using ALE equation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 1): 33-38. (in Chinese)
- 15 于建群, 钱立彬, 于文静, 等. 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 53-57.
YU Jianqun, QIAN Libin, YU Wenjing, et al. DEM analysis of the resistances applied on furrow openers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 53-57. (in Chinese)
- 16 潘世强, 操子夫, 杨雨林, 等. 基于离散元法的芯铧式开沟器设计[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 23-27.
PAN Shiqiang, CAO Zifu, YANG Yulin, et al. The design of furrow opener based on discrete element method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 23-27. (in Chinese)
- 17 杨望, 蔡敢为, 杨坚. 土壤直剪试验的动力学仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 96-101.
YANG Wang, CAI Ganwei, YANG Jian. Dynamics simulation of direct shear test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 96-101. (in Chinese)
- 18 李良品. 基于 SPH 法的板结土壤深耕技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
LI Liangjing. Research on deep plowing for compacted soil based on SPH[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010. (in Chinese)
- 19 卢彩云, 何进, 李洪文, 等. 基于 SPH 算法的平面刀土土壤切削过程模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 134-139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140822&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.022.
LU Caiyun, HE Jin, LI Hongwen, et al. Simulation of soil cutting process by plane blade based on SPH method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 134-139. (in Chinese)
- 20 朱留宪, 杨玲, 朱超, 等. 基于 SPH 算法的微耕机旋耕切土仿真研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(6): 19-22.
ZHU Liuxian, YANG Ling, ZHU Chao, et al. Simulation research of soil-cutting of mini-tiller rotary tillage based on SPH algorithm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(6): 19-22. (in Chinese)
- 21 姜雯, 张倩, 张洪生. 不同种植密度下缓/控释肥施肥量对夏玉米氮利用和籽粒产量影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(27): 111-115.
JIANG Wen, ZHANG Qian, ZHANG Hongsheng. Effects of controlled and slow release fertilizers on the N utilization and grain yield in summer maize under different plant densities[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(27): 111-115. (in Chinese)
- 22 BOJANOWSKI C. Numerical modeling of large deformations in soil structure interaction problems using FE, EFG, SPH, and MM-ALE formulations[J]. Archive of Applied Mechanics, 2014, 84(5): 743-755.
- 23 CUOMO S, PRIME N, IANNONE A, et al. Large deformation FEM-LIP drained analysis of a vertical cut[J]. Acta Geotechnica, 2013, 8(2): 125-136.
- 24 JANSEN J A, WORTMANN C S, STOCKTON M A, et al. Maximizing net returns to financially constrained fertilizer use[J]. Agronomy Journal, 2013, 105(3): 573-578.
- 25 REID J D, COON B A, LEWIS B A, et al. Evaluation of LS-DYNA soil material model l47[R]. Volpe National Transportation Systems Center, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-HRT-04-094, 2004.
- 26 LEWIS B A. Manual for LS-DYNA soil material model l47 [R]. Volpe National Transportation Systems Center, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-04-095, 2004.
- 27 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 单粒(精密)播种机试验方法: GB/T 6973—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.